

# VU Research Portal

## **Mechanical properties of the mandibular condyle and consequences for habitual loading and deformation**

van Ruijven, L.J.

2010

### **document version**

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

### **citation for published version (APA)**

van Ruijven, L. J. (2010). *Mechanical properties of the mandibular condyle and consequences for habitual loading and deformation*. [PhD-Thesis - Research and graduation internal, Vrije Universiteit Amsterdam].

### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

### **E-mail address:**

[vuresearchportal.ub@vu.nl](mailto:vuresearchportal.ub@vu.nl)

## **Mechanische eigenschappen van het kaakkopje en de gevolgen voor gewone belastingen en vervormingen.**

De humane onderkaak bestaat uit een gebogen horizontaal deel genaamd het corpus. Aan beide uiteinden bevinden zich verticale delen, de rami, met aan de bovenzijde de processus coronoidius en aan de achterzijde de condyl. De buitenkant van de condyl bestaat uit massief bot en wordt de cortex genoemd, de binnenkant bestaat uit sponsachtig bot dat trabeculair bot wordt genoemd. De twee condyli vormen samen met de temporale botten onder de schedel het temporomandibulaire gewricht. Dit kan roteren rond een mediolaterale en een verticale as en transleren in de voor-achterwaardse richting. Tijdens statisch klemmen kan de reactiekracht in het gewricht oplopen tot 500 N. Het verrichten van deze taken zonder complicaties stelt hoge eisen aan de onderkaak. Voordat dit onderzoek begon was er weinig bekend over de mechanische eigenschappen van de condyl. Ook de rek- en trekverdelingen tijdens dagelijkse belastingen waren onbekend. In dit proefschrift werden de mechanische eigenschappen van de condyl bestudeerd en de rekken en spanningen bepaald, die tijdens dagelijkse belastingen optreden.

### **De trabeculaire eigenschappen**

De stijfheid van trabeculair bot kan bepaald worden als de stijfheid van het botweefsel en de structuur van het sponsachtige weefsel bekend zijn. Een exacte maar zeer rekenintensieve methode begint met een reconstructie van de ruimtelijke structuur middels een eindig aantal volume elementen. Nadat elk element een stijfheid heeft gekregen, wordt de reconstructie over een vaste lengte verkort en de kracht berekend die volgens de wetten van de mechanica hiervoor nodig is. Deze kracht is evenredig met de trabeculaire stijfheid.

Een minder exacte methode gebruikt empirische relaties tussen de stijfheid en de morfologische eigenschappen (de dichtheid en de orientatie van de botkalkjes) van het trabeculaire bot. Zodra de morfologische eigenschappen bepaald zijn, worden hun waarden in de empirische relaties gesubstitueerd en de stijfheid berekend. Voor dit proefschrift zijn preparaten van het trabeculair bot van het kaakkopje verzameld en gescand met microCT.

Van een aantal daarvan was ook de stijfheid gemeten. In **hoofdstuk 2** werd getoond dat de exacte en de empirische methode even goed presteren, beide kunnen 90% van de variatie in de gemeten stijfheid voorspellen. In de **hoofdstukken 2, 3 en 4** werd de eindige elementen methode gebruikt om de eigenschappen van het trabeculaire bot in het kaakkopje te bepalen.

**Hoofdstuk 3** liet zien dat de trabeculaire stijfheid afhangt van de plaats in het bot en de richting van de toegepaste kracht. Krachten in het sagittale vlak ondervinden een grotere stijfheid dan krachten loodrecht op dit vlak. De verhouding tussen deze twee stijfheden varieert van 4,7 tot 10,8 en is groter als de bot volume verhouding laag is. Superolateraal is de stijfheid het grootst en inferomediaal was hij 10% lager. De botvolumeverhouding was superolateraal eveneens het hoogst en inferomediaal het laagst. De richting waarlangs de hoogste stijfheid werd gevonden correleerde significant met de hoofdrichting van de botbalkjes. Er is blijkbaar een duidelijke overeenkomst tussen de morfologische en de mechanische eigenschappen.

De mechanische eigenschappen voor trabeculair bot, zoals beschreven in de **hoofdstukken 2 en 3**, komen overeen met de eigenschappen die in andere botten gevonden zijn. In alle botten is er een sterke relatie tussen de vorm en de mechanische eigenschappen. Algemeen wordt aangenomen dat de vorm van de botbalkjes het gevolg is van aanpassing van het bot aan dagelijkse belastingen. En deze aanpassing laat weinig ruimte over voor willekeurige variaties. Maar dit verklaart niet waarom de anisotropie van de botvolumeverhouding afhangt. Het is zelfs de vraag of de toename van de anisotropie tot een betere of een slechtere aanpassing leidt.

Als de stijfheid van sponsachtig bot bekend is, kan de eindige elementen methode gebruikt worden om de (effectieve) stijfheid van het botweefsel te bepalen. In **hoofdstuk 4** werd dit gedaan en het bleek dat de effectieve stijfheid gemiddeld  $11,1 \pm 3,2$  GPa (gemid  $\pm$  SD) was. In mediolaterale balkjes was zij hoger, en zij was hoger als de bot volume verhouding lager was. Deze evenredigheid was sterker in de mediolaterale botbalkjes. De achtergrond van deze relaties blijft onzeker. Het is geopperd dat de stijfheid evenredig is aan de mineralisatiegraad van botweefsel,, die dan weer omgekeerd evenredig is aan de

vervangingssnelheid van bot. Als dat klopt, suggeren de resultaten dat de vervangingssnelheid hoger is in verticale botbalkjes en in preparaten met een hoge botvolumeverhouding. Het is duidelijk dat deze botbalkjes hogere spanningen ondergaan. Maar het is onduidelijk of de rek ook hoger is in deze botbalkjes en de botcellen worden eerder gestimuleerd door de rek dan door de spanning.

Met de topologische eigenschappen van fragmentjes bot is het mogelijk om de botbalkjes te onderscheiden van botplaatjes. In **hoofdstuk 5** wordt een programma gepresenteerd dat deze methode gebruikt. In 94 preparaten, afkomstig van betande en tandeloze mensen en met een botvolumeverhouding die varieert van 7% tot 30%, identificeerde het programma 81% van het botvolume als botplaatjes en 11% als botbalkje. Het overige weefsel bestond voornamelijk uit verbindingen tussen balkjes en/of platen. In elk preparaat waren de platen dikker dan de balkjes. De dikte, het aantal en de volumeverhouding van de platen correleerden met de botvolumeverhouding.

Het volume-aandeel en het aantal van de balkjes waren omgekeerd evenredig met de botvolumeverhouding, maar de dikte van de balkjes bleef constant. Een afname met 75% van de botvolumeverhouding leidde tot een afname van het aantal platen met 65%; afname van de plaatdikte met een 40% en een toename van zowel het aantal als het volume van de balkjes met 300%. De toename van het aantal balkjes in preparaten met een lage botvolumeverhouding is hoost waarschijnlijk het gevolg van gaten die in de platen vallen als zij dunner worden tijdens botverlies. De toename van het aantal balkjes gecombineerd met het dunner worden van de platen kan heel goed de oorzaak zijn van het niet-lineaire verband tussen de botvolumeverhouding en de stijfheid van bot, zoals werd gevonden in de **hoofdstukken 2 en 3**. De bevindingen dat (1) de dikte van de dunste botbalkjes constant bleef, terwijl (2) de dikte van de dikkere platen wel afnam, suggereert dat er een minimale dikte is voor botbalkjes. Het zou kunnen dat verdere verdunning van de platen resulteert in gaten en verdere verdunning van de balkjes leidt tot breuken,. Deze zorgen dat de rek nul wordt, waardoor de achterblijvende fragmenten helemaal verdwijnen.

## Spanningen en rekken in de kaakkop

Zoals getoond, heeft het trabeculaire bot in de kaakkop een hoge anisotropie. Dat roept de vraag op of dat een mechanisch voordeel oplevert tijdens het dagelijkse gebruik. Als isotropie leidt tot grotere verticale dan mediolaterale rekken, is anisotropie voordelig. In **hoofdstuk 6** is een eindige elementen model van de kaakkop, met isotropisch gemodelleerd trabeculair bot onderworpen aan belastingen vergelijkbaar met dagelijkse belastingen. Het resultaat was dat vervormingen in de mediolaterale richting veel kleiner waren dan die in sagittale doorsneden. Het patroon van de spanningen en rekken leek op het patroon van de vervormingen. In sagittale doorsneden kwamen compressie en extensie voor in richtingen loodrecht op elkaar. In de mediolaterale richting was de rek 5 to 20 keer kleiner. Tijdens het kauwen draaien de spanningen en rek heen en weer in het sagittale vlak, maar in de mediolaterale richting blijven ze klein. Dus de weerstand tegen dagelijkse belastingen neemt toe als de stijfheid van het bot groter is in de voorwaartse, apikale en achterwaarts richting, en kleiner in de mediolaterale richting. Aangezien dit inderdaad het geval lijkt te zijn, is de structuur optimaal voor de spanningen en rek die dagelijks optreden tijdens kauwen.

De mineralisatiegraad in de kaakkop liet relatief grote variaties zien in zowel corticaal ( $884 \pm 11 \text{ mg/cm}^3$ ) als trabeculair bot. ( $738 \pm 101 \text{ mg/cm}^3$ ) (**Hoofdstuk 7**). Omdat de relatie tussen de mineralisatiegraad en de stijfheid een machtswet is, leidt dit tot grote variaties in de stijfheid. Dat roept de vraag op of dit een grote invloed op de vervorming en de rek in de kaakkop heeft. In **hoofdstuk 7** wordt een computermodel van de kaakkop gepresenteerd, dat onderworpen werd aan dagelijkse belastingpatronen, en drie verschillende relaties gebruikte om de botstijfheid te berekenen op basis van de mineralisatiegraad. Grotere variaties in stijfheid deden de vervorming, de spanningen en de rek toenemen. Bijvoorbeeld: de afstand tussen het voorste en achterste oppervlak in de mid-sagittale doorsnede (die 7,7 mm is in de onbelaste toestand) nam afhankelijk van de gebruikte relatie respectievelijk toe met 0,29, 0,35 en 0,51 mm. De inhomogene verdeling leidde ook tot een toename van de spanningen en rek in de cortex.

In trabeculair bot deed de inhomogene verdeling de rek toenemen, terwijl de spanning afnam. Deze veranderingen waren relatief klein in de cortex ( $<20\%$ ) maar groot ( $50\%$ ) in trabeculair bot. Alhoewel het faalrisico niet expliciet was bepaald in deze studie, is het waarschijnlijk dat de toename van zowel de gemiddelde rek als de spreiding van de rek het faalrisico aanzienlijk verhoogd hebben. De invoering van de inhomogene minerale verdeling heeft een groter effect op de trabeculaire dan op de corticale parameters. Afhankelijk van de gekozen parameter kan de verandering variëren van een daling met  $50\%$  tot een toename met  $100\%$ .

In **hoofdstuk 8** werden regionale verschillen in spanning, rek en mineralisatiegraad bestudeerd in corticaal bot van de kaakkop. De mineralisatiegraad was het laagst in het subchondrale bot. De grootte van de spanningen en rek was niet afhankelijk van de afstand tot het mid-sagittale vlak. De cortex aan de voorzijde onderging hoofdzakelijk extensie en de aan de achterzijde compressie. Achter waren de equivalente rek, von Mises spanning en de energiedichtheid van de rek het grootst, in het subchondrale bot waren ze het kleinst. In zowel de voorste als de achterste cortex was de oriëntatie van de hoofdrek vertikaal en waaierachtig. In het subchondrale bot was de hoofdrek compressief in de voor-achter richting.

De oriëntatie van de kanalen van Haver wordt bepaald door de rek in het bot. Hun oriëntatie zou gelijk moeten zijn aan de richting van de hoofdrek. In zowel de voorste als de achterste cortex komt de oriëntatie van de hoofdrek overeen met de oriëntatie van de kanalen van Haver. Echter, in het subchondrale bot valt de oriëntatie van de kanalen van Haver niet samen met de oriëntatie van de eerste hoofdrek. Het is wel aangetoond dat de afwezigheid van kraakbeen in het model tot een overschatting van de voor-achterwarste compressie leidt. aangezien de tweede hoofdrek slechts  $30\%$  kleiner is dan de eerste, is er een redelijke kans dat de afwezigheid van kraakbeen tot een omkering van de eerste en tweede hoofdrek heeft geleid. Temeer daar de richting van de kanalen van Haver wel samenvalt met de tweede hoofdrek.

## **Algemene conclusies**

Gebaseerd op meestal visuele analyses hebben verschillende studies geopperd dat de architectuur van de kaakkop sterk geoptimaliseerd is voor de dagelijks voorkomende spanningen en rek. In dit proefschrift zijn voor het eerst de mechanische eigenschappen en de spanningen en rek op het niveau van de micrometer bepaald. De eigenschappen hangen sterk af van de dentitie. In betande personen en in vertikaal georiënteerd bot is de stijfheid van het botweefsel lager (en waarschijnlijk minder bros). Maar de trabeculaire stijfheid is juist hoger in betande mensen en in de vertikale richting. De variaties in de trabeculaire stijfheid (ten gevolge van verschillen in dentitie en richting) komen precies overeen met de dagelijkse variaties in spanningen veroorzaakt door het kauwen. Met andere woorden de architectuur van trabeculair is sterk geoptimaliseerd voor rek. In computermodellen van de kaakkop wordt de stijfheid van het botweefsel meestal constant verondersteld. Deze vereenvoudiging kan grote gevolgen hebben voor de berekende spanningen en rek in het trabeculaire bot; echter voor het corticale bot is de fout relatief klein. Tijdens statisch klemmen van de onderkaak wordt de cortex aan de voorkant uitgerekt en aan de achterkant samengedrukt. De oriëntatie van deze rek kwam overeen met de oriëntatie van de kanalen van Haver. De regionale variaties in de spanning en rek waren ongeveer 30% - 35%, wat aangeeft dat de vorm van de kaakkop goed aangepast is.